

principal hasta que toquen al espejo. Uniendo los puntos de incidencia con el foco F y prolongando los rayos reflejados hacia atrás del espejo, se formará en *a b* una imagen *virtual, recta y más grande* que el objeto. En la fig. 192 tenemos la representación de la imagen virtual de una vela encendida. Cuando se coloca el centro de curvatura de un espejo cóncavo y abajo del eje principal un ramo de flores invertido y oculto

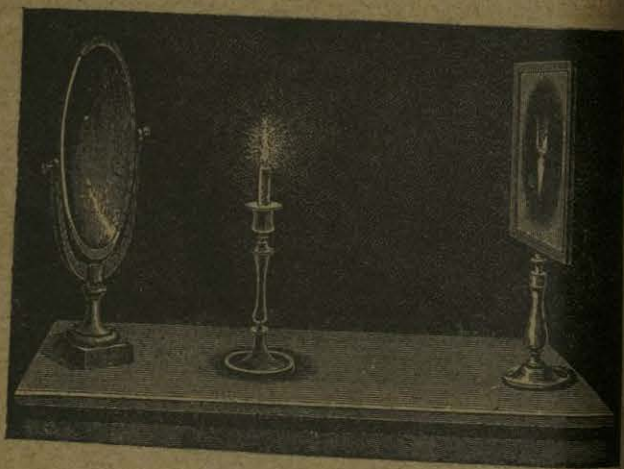


Fig. 193. Imagen real producida por un espejo cóncavo.

de la vista del observador por medio de una caja de madera negra, é iluminamos poderosamente el ramo con una lámpara de magnesio, observamos encima de la caja una imagen *aérea* del ramo, muy clara y del mismo tamaño. Poniendo encima de la caja un vaso con agua y observando á cierta distancia detrás de la caja, parece que un ramo real y verdadero está sumergido dentro del vaso. Es este uno de los más bonitos experimentos de la óptica.

154. *Espejos convexos.*—Por espejo convexo se

entiende un casquete esférico ó parabólico, de metal ó cristal azogado, cuya superficie exterior es la brillante. Los espejos convexos producen solamente *imágenes virtuales* que son siempre *rectas* y más pequeñas que el objeto.

Supongamos un espejo convexo sobre el que cae

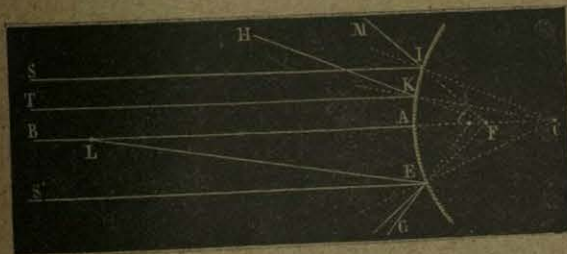


Fig. 194. Espejo convexo.

un rayo incidente *SI* paralelo al eje principal *AC*; ese rayo forma con la normal (que en este caso es la prolongación del radio) el ángulo de incidencia, y al reflejarse sigue la dirección *IM*. Esta línea forma con la misma normal un ángulo de reflexión igual al de incidencia. Si prolongamos el rayo reflejado encontrará al eje principal en el punto *F*, que es el *foco virtual principal* del

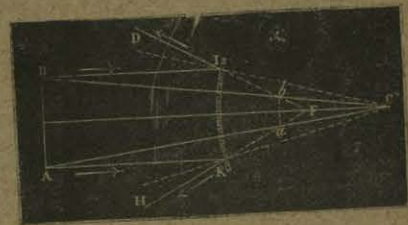


Fig. 195. Imagen en un espejo convexo.

espejo. Considerando el triángulo *FIC* y haciendo las mismas consideraciones que hicimos al hablar de los espejos cóncavos, demostraríamos que el punto *F* divide al radio en dos partes iguales.

Si el punto luminoso lo consideramos situado en el punto *L*, entre el foco virtual principal y el espejo, se producirá un *foco conjugado*, también virtual en el punto *L*, entre el *foco virtual principal* y el espejo.

155. *Construcción de las imágenes.* — Supongamos



Fig. 196. Globo periscópico.

un objeto *AB* situado á una distancia cualquiera. Comenzamos por trazar los ejes secundarios ó sean las líneas que parten de los puntos *A* y *B* y que pasan por el centro de curvatura *C*; trazamos después los rayos *BI* y *AK* paralelos al eje principal, jun-

dad de un cuerpo sonoro, á condición de que este cuerpo pueda vibrar *al unísono* con la nota que se trate de reforzar.

Una cuerda restirada en el aire libre produce un sonido muy débil; pero si se la coloca cerca de una caja sonora, como en el caso del violín ó la guitarra, da un sonido muy intenso. Se puede demos-



Fig. 170. Refuerzo de los sonidos.

trar esto haciendo vibrar un diapasón en la boca de un probeta bastante alta. Cuando la probeta está vacía no se nota refuerzo del sonido; pero vertiendo agua poco á poco, llega un momento en que el sonido se refuerza considerablemente, y deja de estar reforzado si se añade más agua. Midiendo la altura de la columna de aire se ve que es igual á la longitud de un tubo cerrado que diera igual nota que el diapasón.

TEORÍA FÍSICA DE LA MÚSICA

122. *Gama.*—La gama es una serie de sonidos que tienen unos con otros relaciones determinadas. Esos sonidos se llaman notas, y cada una ha recibido un nombre particular. Los nombres de las notas se deben al monje benedictino Gui d'Arezzo, quien los tomó de las sílabas con que comienzan los primeros versos del himno de San Juan.

Ut queant laxis Resonare fibris
Mira gestorum Famuli tuorum
Solve polluti Labii reatum
 Sancte Joannes.

En aquella época la gama estaba solamente formada de seis sonidos, después se añadió un séptimo sonido al que se llamó *si*. Más tarde el uso estableció llamar *do* al *ut*. Las notas de la gama eran primitivamente designadas por medio de letras y este uso se conserva aún en algunos países.

123. *Intervalo.*—Se da el nombre de *intervalo* a la relación que existe entre los números de vibraciones ejecutadas en el mismo tiempo para la producción de los sonidos. Los intervalos de la gama están representados por los números siguientes:

<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>
1	9	5	4	3	5	15
	8	4	3	2	3	8
9	10	16	9	10	9	16
8	9	15	8	9	8	15
T	T'	t	T	T'	T	t

tamos los puntos I y K con el foco F y se formará en *ab* una imagen *virtual, recta y más pequeña* que el objeto.

156. *Aplicaciones.*—Los espejos convexos tienen menos aplicaciones que los espejos cóncavos. Hay unos globos llamados *periscópicos*, de vidrio, cubierto interiormente con una amalgama de bismuto, y que se colocan en los jardines para reflejar el paisaje y objetos inmediatos. (*)

REFRACCIÓN DE LA LUZ

157. Se entiende por *refracción* de la luz el cambio de dirección que experimenta un rayo luminoso al pasar *oblicuamente* de un medio á otro de distinta densidad.

Antes de emprender el estudio de las leyes de la refracción supongamos un rayo luminoso SI que va á pasar del aire al agua. Si al penetrar al agua no se refractara seguiría la dirección IH que es la prolongación de SI; pero como pasa de un medio *menos denso* como el aire á uno *más denso*, que es

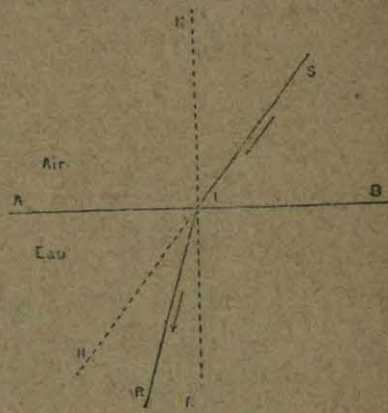


Fig. 197. Rayo que pasa de medio menos denso á más denso.

(*) La Srta. Refugio González García, una de las alumnas más aprovechadas de la Escuela Normal, empleó un hemisferio periscópico para la construcción de un *nefoscopio* de su invención.

el agua, se desvía según IR acercándose á la normal IN'. El ángulo SIN se llama *ángulo de incidencia* y el ángulo RIN' se llama *ángulo de refracción*. En este caso se ve que el ángulo de refracción es menor que el de incidencia.

Pero supongamos que el rayo luminoso SI parte del agua para salir al aire. Si no se refractara seguiría la dirección IH; pero como sale del agua medio más denso, al aire, medio menos denso, se separa de la normal y sigue la dirección IR. El ángulo SIN es el de incidencia y el ángulo RIN' es el de refracción. En este caso el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia.

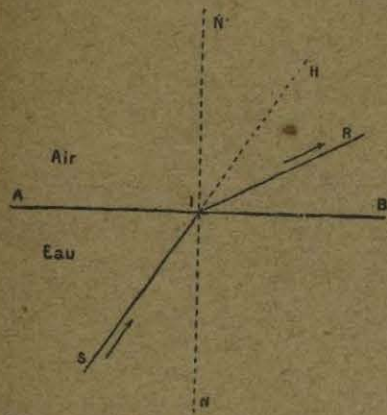


Fig. 198. Rayo que pasa de medio más denso á menos denso.

158. *Leyes de la refracción de la luz.*— Las leyes de la refracción ó *leyes de Descartes*, son las siguientes:

1.^a Para dos medios dados existe una relación constante entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción.

2.^a El rayo incidente y el rayo refractado se encuentran en un mismo plano perpendicular á la superficie de separación de los dos medios.

Para entender bien estas leyes, recordemos, que estando dado un ángulo, si se describe desde un vértice como centro, y con un radio igual á la unidad, un arco AB, se entiende por *seno* del ángulo ACB, ó del arco AB, la perpendicular BP bajada

de una extremidad del arco sobre el radio que pasa por el otro extremo. Si el ángulo va creciendo de 0° á 90°, el seno crece de 0 á 1; si el ángulo continúa creciendo de 90 á 180°, el seno decrece de 1 á 0.

Para demostrar las leyes de la refracción de la luz, se emplea un aparato semejante al que nos sirvió para la reflexión. En el centro del círculo hay en lugar de espejo una caja hemisférica de cristal, donde se puede poner

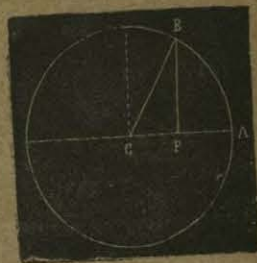


Fig. 199. El seno de un ángulo.

agua ú otro líquido cualquiera.

Supongamos un rayo incidente MO; si no se refractara seguiría dentro del agua la misma dirección; pero como se refracta y pasa de un medio menos denso (aire) á un medio más denso (agua), se acerca á la normal y sigue la dirección OK. Es decir, que en este caso, el ángulo de incidencia IOM es mayor que el ángulo de refracción EOK. Una



Fig. 200. Aparato para la refracción.

vez que se ha observado la luz en e se aprietan los tornillos y con la regla AB se miden los senos HF

y HK, se divide el primero por el segundo y el cociente se llama *índice de refracción*. Este índice es constante para cada dos medios. Representando por n el índice, por i el ángulo de incidencia y por r el ángulo de refracción, tendremos:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n.$$

El índice de refracción del aire al agua es de $\frac{4}{3}$ y del agua al aire es de $\frac{3}{4}$; el índice de refracción del aire al vidrio es de $\frac{3}{2}$ y del vidrio al aire es de $\frac{2}{3}$.

159. *Angulo limite. — Reflexión total.* — Indicamos (fig. 198) que cuando un rayo luminoso pasa de un medio más refringente a otro menos refringente, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia. Si va aumentando el valor del ángulo de incidencia llegará un momento en que el rayo refractado OR se dirigirá rasando la superficie del líquido.



Fig. 201. Reflexión total.

El ángulo SOB se llama *ángulo limite* porque basta aumentar un poco el valor de la incidencia para que ya no haya rayo refractado, sino que la luz se refleje interiormente. Si consideramos el rayo PO se reflejará dentro del agua en la dirección OQ; este fenómeno se conoce con el nombre de *reflexión total*, porque la luz incidente se refleja en su totalidad.

En el caso de un rayo luminoso que pasa del agua al aire, el valor del ángulo límite es de 48° y cuando pasa del vidrio al aire tiene por medida 42° .

Cuando se introduce un bastón oblicuamente en el agua, el bastón parece quebrado, á causa de la desviación que experimentan los rayos luminosos al pasar del agua al aire.

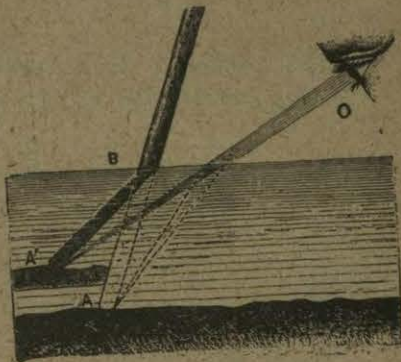


Fig. 202. Un caso de refracción.

160. *Doble refracción.* — Existen algunos cuerpos cristalizados, como el espato de Islandia y el cristal de roca, en los cuales cada rayo incidente da origen á dos rayos refractados, uno de los cuales sigue las leyes de la refracción y otro no. Si colocamos debajo de un cristal de roca unas letras, éstas se observan duplicadas. El fenómeno se conoce con el nombre de *doble refracción*.

161. *Espejismo.* — Consiste este meteoro en la re-



Fig. 203. Doble refracción.

producción engañosa de algún objeto en la atmósfera. Se observa este fenómeno con mucha frecuencia en los grandes desiertos, pudiendo observarse igualmente en la superficie del mar.

El físico Monge, uno de los sabios que componían el Instituto de Egipto en la gran expedición de Bonaparte, explica la teoría del espejismo de la manera siguiente:

Siempre que los rayos luminosos que parten de un objeto tienen que atravesar medios de distinta densidad sufren una desviación, según hemos dicho al hablar de la refracción. Pues bien, los rayos del Sol al atravesar las capas atmosféricas las calientan



Fig. 204. Espejismo inferior.

más ó menos; pero cuando esos mismos rayos tocan con el suelo y éste es mejor conductor del calor que las capas del aire, resulta que adquiere una gran temperatura. Esta, por radiación, se comunica á las capas inferiores de la atmósfera, y como tanto los desiertos como el mar no presentan generalmente ninguna elevación, la atmósfera se halla tranquila y el equilibrio de las capas de aire no se establece á pesar de las corrientes débiles que se forman.

Supongamos un rayo que partiendo del objeto A llega y se refracta al penetrar en una capa de aire.

Como ésta es más densa que la que se encuentra abajo de ella se alejará de la normal. En la que sigue se verificará lo mismo hasta que llegue al punto O; como el ángulo de refracción va aumentando constantemente, resulta que al llegar al punto O tiene un valor máximo que se llama *ángulo límite*. Sufre, entonces, la *reflexión total* que obliga al rayo á subir, y describirá un camino semejante, pero en sentido inverso, hasta llegar al punto en que se encuentra el observador. De manera que en la última capa de aire el rayo se ha reflejado como en un espejo, lo que hace creer que existe una superficie líquida á donde se refleja el objeto. A esta clase de meteoro se le ha dado el nombre de *espejismo inferior*.

Espejismo superior ó inverso, en contraposición al anterior, se observa con mayor frecuencia en el mar que en la llanura. Se presenta bajo tres aspectos: cuando se ve la imagen invertida sobre el objeto y sobre aquella otra imagen recta; cuando sólo se presenta la primera y cuando sólo se conserva la imagen recta.

Para este fenómeno se necesita que las capas superiores se encuentren tranquilas y que sean menos densas que las inferiores.

Por último, existe el espejismo *lateral*, para cuya verificación se necesita que las capas atmosféricas, desigualmente calentadas, estén separadas por un plano vertical como una montaña, un muro, etc., pues entonces éstos se calientan más y vienen á desempeñar el mismo papel que la superficie del desierto en el espejismo inferior.

PRISMAS

162. El prisma óptico no es igual al prisma métrico. En Optica se entiende por *prisma* todo cuerpo transparente limitado por dos caras planas inclinadas una sobre otra. La intersección de estas caras es una línea que se llama *arista* del prisma, y el ángulo diedro formado por ella, se denomina el ángulo de refringencia.

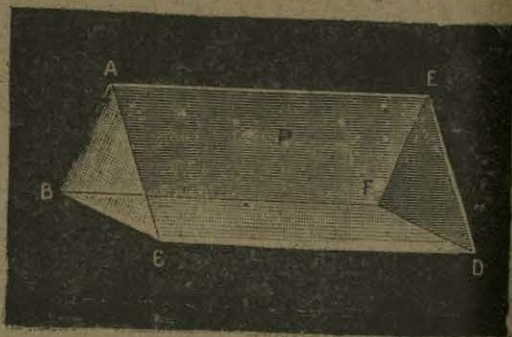


Fig. 205. El prisma.

En la figura 205 las superficies planas ACDE y ABFE son las caras del prisma, la línea AE es la arista del prisma, la superficie BCDF es la base y el ángulo BAC es el ángulo de refringencia. Si cortamos el prisma por un plano perpendicular á la arista obtendremos por sección un triángulo, y es precisamente en una sección en donde estudiaremos la marcha de la luz en un prisma.

163. *Marcha de la luz.*—Supongamos el prisma de vidrio ABC y un rayo incidente SI que cae sobre la cara AB. El rayo al entrar al prisma se acerca á la normal y sigue la dirección II', y al

salir se separa de la normal siguiendo la dirección I'E. Así es que vemos que el rayo luminoso sufrió dos refracciones sucesivas y se desvió hacia la base del prisma. De manera que un objeto luminoso ó

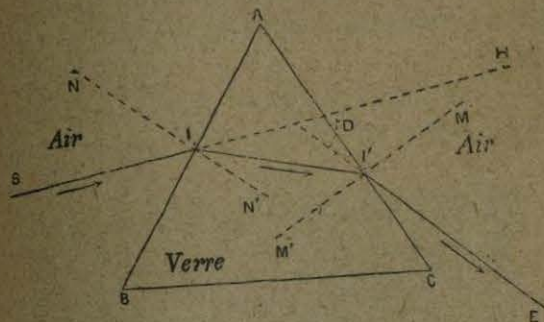


Fig. 206. Marcha de la luz en el prisma.

iluminado colocado en S se observará la prolongación del rayo emergente E I'.

Experimento núm. 38.—Un observador colocado frente á un prisma de arista horizontal verá una imagen virtual y elevada en el sentido vertical, de una vela colocada del otro lado.

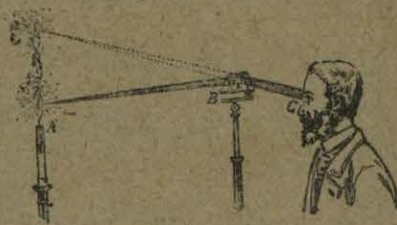


Fig. 207. Imagen á través de un prisma

El fenómeno de la desviación de la luz en un prisma no es tan sencillo como

á primera vista parece, según vamos á ver.

164. *El espectro.*—Cuando la luz blanca del sol ó de un cuerpo sólido incandescente pasa á través del prisma no solamente hay refracción, sino que la luz blanca se descompone en otras varias luces de

diversa coloración. El gran físico Isaac Newton quien descubrió y estudió este fenómeno, al dió el nombre de *dispersión*.

Experimento núm. 39.—Por un agujero practicado en la puerta de un cuarto obscuro hacemos pasar un haz de luz solar, que recibimos en un prisma de cristal. La luz se refracta y al recibir en una pantalla tallada un haz divergente observaremos una faja de colores en la que hay colores de muy diversos tonos

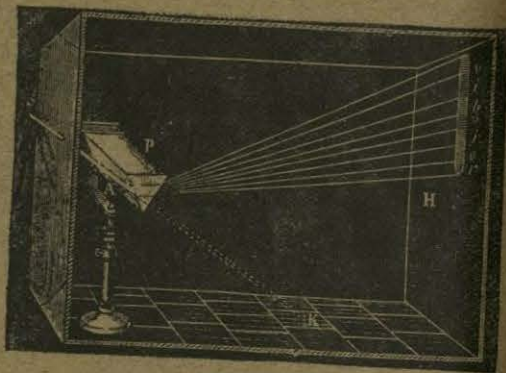


Fig. 208. La descomposición de la luz.

pero los siete dominantes son los siguientes en el orden respectivo:

Rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, indigo, violeta.

Newton dió á esta faja que contiene los colores del arco iris el nombre de *espectro solar*. El violeta es el que ocupa mayor extensión en el espectro y el amarillo es el que ocupa menos espacio.

En los espectros de las luces artificiales sólo se observan los colores del espectro solar dispuestos en el mismo orden; pero, en general, faltan algunos, y la intensidad relativa no es la misma. En las llamas

artificiales el color que se hace más notable es el predominante en la flama. Así es que una llama amarilla produce un espectro en que domina el color amarillo; una llama verde da un espectro en que el color verde es el que domina.

165. *Regla de Newton.*—El físico Newton daba la siguiente regla para obtener un espectro puro, con los haces de colores bien separados.

Recíbese la luz por una hendidura delgada paralela á la arista refringente de los rayos y se interpone en el trayecto de los rayos incidentes una lente acromática á una distancia de la hendidura igual al doble de la focal de la lente. Colócase la pantalla del otro lado de la lente y á la misma distancia $2f$, y se tiene cuidado de orientar el prisma en la posición de la desviación mínima.

LENES

166. Se da el nombre de *lentes* á unos medios transparentes limitados por caras curvas. Combinando las caras curvas entre sí ó con caras planas, resultan las seis clases de lentes que siguen:

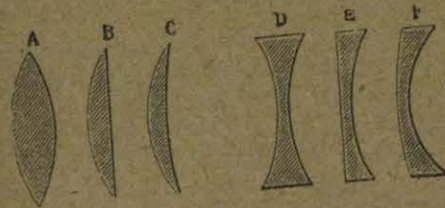


Fig. 209. Diversas clases de lentes.

biconvexa, plano-convexa, cóncavo-convexa, bicóncava, plano-cóncava y cóncavo-cóncava.

Las lentes refractan la luz haciendo converger ó diverger á los rayos luminosos que las atraviesan.

Las lentes se construyen de *crown-glass*, que contiene escasa cantidad de plomo, ó de *glass*, vidrio que contiene mucho plomo y que es más refringente que el primero.

En las lentes de superficies esféricas los centros de esas esferas se llaman *centros de curvatura*. La línea recta que pasa por los centros recibe el nombre de *eje principal*. En una lente la normal es la perpendicular al plano tangente que pasa por el punto considerado.

167. *Focos*.—Supongamos una lente biconvexa

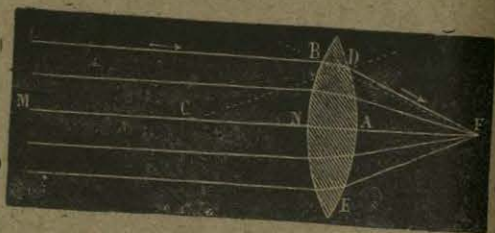


Fig. 210. Foco principal de una lente biconvexa.

sobre la cual incide un rayo luminoso *LB*, paralelo al eje principal; este rayo al pasar del aire al vidrio se acerca á la normal y sigue la dirección *BD*, y al salir otra vez al aire se separa de la normal y sigue la dirección *DF*. Cualquier otro rayo paralelo al eje principal iría, después de refractarse, á dar en el punto *F*. Este punto, á donde se reúnen todos los rayos que proceden de rayos paralelos al eje principal, se llama *foco principal* de la lente y la distancia *AF* es la distancia *focal principal* que es constante para cada lente, pero que varía con el radio de curvatura y con el índice de refracción.

Se comprende fácilmente que si el manantial luminoso está colocado en el punto *F*, los rayos

emergentes constituirán un haz paralelo al eje principal.

Si suponemos un punto luminoso colocado en el eje principal más allá de la distancia focal principal, la experiencia prueba que todos los rayos emitidos por ese punto van á reunirse del otro lado de la lente en un punto situado también sobre el eje principal y que se designa con el nombre de *foco conjugado*. Si el punto luminoso se va acercando á la lente, el foco conjugado se aleja y cuando el punto coincide con el foco principal los rayos emergentes salen paralelos al eje y el foco conjugado se va á formar en el infinito.

Si el punto luminoso sigue avanzando y se coloca entre el foco principal y la lente, el foco conjugado se convierte en *foco virtual* que quedará situado del mismo lado de la lente en donde se halla el punto luminoso.

168. *Centro óptico*.—Si en una lente trazamos dos radios de curvatura paralelos y unimos los extremos que tocan á las caras por una línea recta, el punto en que esta línea corta al eje principal se llama *centro óptico*. Todo rayo que pasa por este punto no sufre desviación angular y al salir sigue una dirección paralela á la del rayo incidente.

Todas las líneas que pasan por el centro óptico de una lente se conocen con el nombre de *ejes secundarios*.

169. *Construcción de las imágenes*.—Las lentes biconvexas pueden dar imágenes *reales* é imágenes *virtuales*. Las primeras pueden ser más grandes, más pequeñas ó del mismo tamaño que el objeto y son siempre *invertidas*. Las virtuales son siempre más grandes que el objeto y son *rectas*.

Consideremos la flama A B de una bujía situada frente á una lente á una distancia mayor que focal. Comenzamos por trazar los ejes secundarios A O y B O; en seguida trazamos unos rayos paralelos al eje principal, que pasan por el foco y encuentran respectivamente á los ejes secundarios en los puntos A' y B'. Juntando A' con B' obtendremos una im-

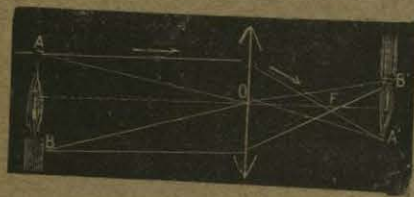


Fig. 211. Trazado de una imagen real en una lente biconvexa.



Fig. 212. Imagen real, invertida y más grande.

gen de la flama, que reunirá las condiciones de ser real, más pequeña é invertida.

Ahora bien, si marcamos el lugar donde está la vela y el lugar en que se produjo la imagen y

llevamos la vela al lugar de la imagen, veremos producirse, donde estaba la vela, una imagen real, invertida y más grande, que es lo que se observa en la figura.

Cuando el objeto está colocado á una distancia doble de la distancia focal principal, la imagen se produce del otro lado, á la misma distancia y es del mismo tamaño que el objeto.

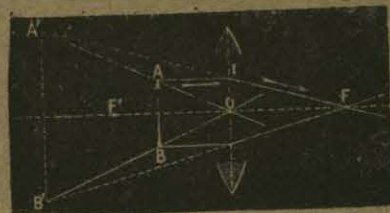


Fig. 213. Imagen virtual.

Cuando el objeto está colocado en el foco la imagen se produce en el infinito; es decir, no hay imagen.

Si el objeto está colocado entre el foco principal y la lente, es decir, á una distancia menor que la focal, la imagen es virtual. Supongamos un objeto

AB situado entre la lente y el foco. Trazamos los ejes secundarios A O y B O y en seguida dos rayos paralelos al eje principal; juntamos las extremidades de

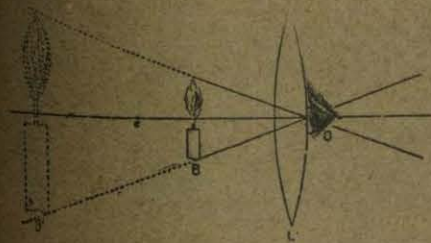


Fig. 214. Imagen virtual de una vela.

estos rayos con el foco F y las prolongamos hacia el otro lado hasta que encuentren á los ejes secundarios. Entonces se formará en A'B' una imagen virtual, recta y más grande que el objeto.

Si observamos una bujía á través de una lente

biconvexa, veremos la imagen mucho grande y en su posición natural. Es el caso de la lente de aumento ó microscopio simple; pero repetimos que para que esto suceda se necesita que la vela es

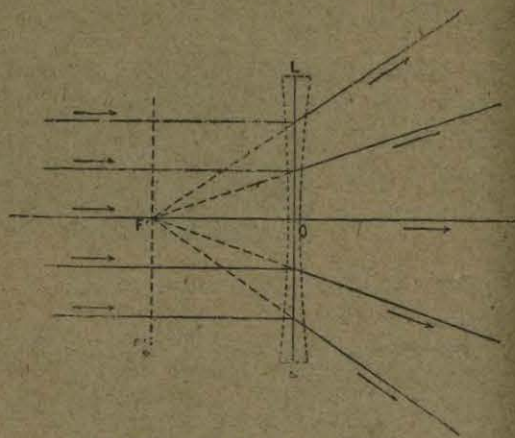


Fig. 215. Caso de la lente biconcava.

colocada frente á la lente á una distancia menor que la focal principal.

170. *Lentes biconcavas.*—Supongamos una lente biconcava LL' y un haz de rayos paralelos que incide sobre ella. Los rayos al salir de la lente forman un haz divergente y si los prolongamos hacia atrás se reunirán en el punto F' que es el foco de la lente.

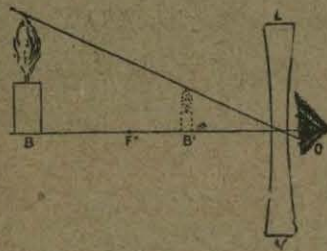


Fig. 216. Trazado de una imagen en una lente biconcava.

una bujía B colocada frente á una lente biconcava. Trazamos los ejes secundarios, llevamos después re

171. *Trazado de la imagen.*—Supongamos

rayos paralelos al eje principal hasta encontrar la lente, juntamos los puntos de incidencia con el foco que queda del mismo lado del objeto, y los puntos donde estas líneas encuentran á los ejes secundarios serán las imágenes de las extremidades del objeto. Como en el caso de la figura 216 hemos considerado la bujía apoyada sobre el eje principal y perpendicularmente al mismo eje, no hay necesidad de determinar más que la imagen de la punta de la flama. La imagen que resulta es *virtual, recta y más pequeña* que el objeto.

DISPERSIÓN

172. *Los colores del espectro son simples y desigualmente refrangibles.*—Por medio de una pantalla aislamos uno de los colores del espectro y este color lo hacemos pasar por otro prisma; se observa también una desviación, pero ya no hay dispersión;

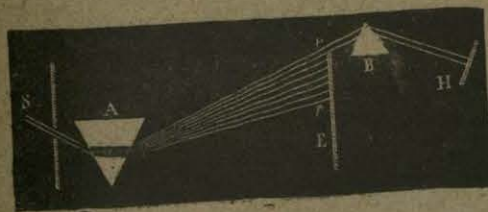


Fig. 217. Los colores son simples.

este rayo aislado conserva el mismo color. Lo mismo sucedería con cualquier otro color que aisláramos, de donde se deduce que los colores del espectro *son simples*, es decir, que el prisma ya no los puede descomponer.

Además, todos los distintos colores de que se